# EROSIÓN EN PLAYAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: MODELACIÓN NUMÉRICA DE EVENTOS SEVEROS

**INFORME TÉCNICO**

**por**

**Walter Dragani y Guadalupe Alonso**

**Servicio de Hidrografía Naval - CONICET**

**en el marco del proyecto**

***"DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA PARA TRATAR EL PROBLEMA DE LA EROSIÓN EN LA COSTA BONAERENSE"***

*Octubre, 2011*

*Ciudad Autónoma de Buenos Aires*

## INTRODUCCIÓN

Se denomina perfil de playa a la transecta perpendicular a la línea de costa sobre la cual se establece la altura del terreno, subaéreo o subácueo, con respecto a algún punto fijo conocido (Fig. 1). En general, un perfil de playa completo debería comenzar en la base de la primera línea de médanos y extenderse hasta la profundidad de clausura (es decir, aquella profundidad en la que no hay movimiento de sedimentos del fondo). La acción de los diversos procesos litorales queda manifestada por la variación espacio-temporal de los perfiles ya que éstos están permanentemente adaptándose a las condiciones de la zona litoral. Asimismo, tanto la erosión como la acreción de carácter progresivo, también quedan claramente reflejadas tras la comparación de perfiles de playa sucesivos.

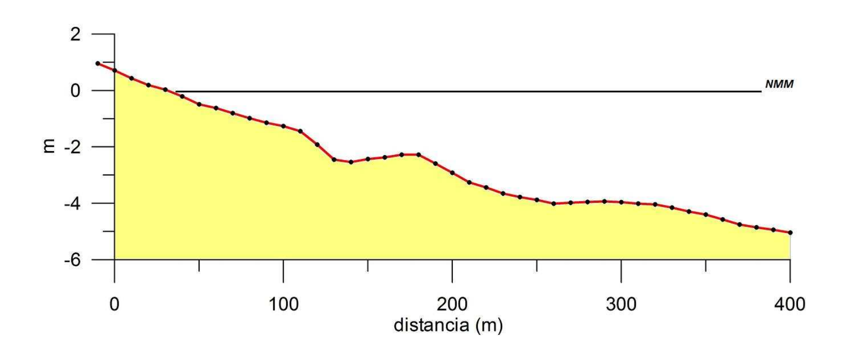



*Figura 1. Esquema de un perfil de playa típico.*

Una consideración fundamental en el estudio de la variabilidad de los perfiles de playa es la existencia de un hipotético perfil de equilibrio al cual tendería la playa si estuviese expuesta a condiciones de buen tiempo durante algunos meses (Dean and Dalrymple, 2002). Si un perfil de playa no estuviese en equilibrio con las olas incidentes, la arena se redistribuiría gradualmente hasta que la playa logre alcanzar el equilibrio. Las variaciones del nivel del mar, las olas - con sus complejas transformaciones en aguas intermedias y poco profundas - y el transporte de sedimento, son los principales procesos litorales responsables de los cambios en el perfil de playa.

En cualquier sitio costero, la altura del nivel del mar fluctúa permanentemente debido a la acción de la marea, las olas y el viento. Desde el punto de vista de los procesos litorales, deben ser consideradas las fluctuaciones del nivel de mar debidas a la marea y el viento ya que modifican permanentemente la posición de la línea de rompiente y, consecuentemente, la posición de las

barras de rompiente y el perfil de las corrientes litorales paralelas a la costa generadas por las olas (Komar, 1998). Durante mareas de sicigia o en condiciones de onda de tormenta el agua suele alcanzar zonas de la playa sub-aérea (normalmente seca) y la primera línea de médanos, ampliando considerablemente la zona afectada por las olas. Justamente, la evolución de los perfiles bajo estas condiciones son las que se estudian en este Informe.

Desde el punto de vista práctico, es conveniente discriminar al movimiento del sedimento costero en dos componentes: el transporte paralelo y el perpendicular a la costa. En general, el perfil de playa está en equilibrio con el lento y continuo transporte de arena paralelo a la costa. Luego de tormentas severas, con presencia de onda de tormenta y alturas de ola considerables, el perfil de playa presenta modificaciones significativas y, en estos casos, el transporte de arena transversal o perpendicular a la línea de costa juega un papel relevante no solo en la erosión sino también en la recomposición de la playa. En situaciones donde está involucrada la pérdida de sedimento, tales como en la boca de un río o en cercanías de estructuras costeras como escolleras y muelles, el transporte de sedimento paralelo a la costa es el proceso que gobierna los cambios en la topografía y de ninguna manera puede ser despreciado. En algunos casos particulares, se verifica un significativo desplazamiento de sedimento paralelo a la costa, que involucra el transporte de miles y hasta centenas de miles de metros cúbicos de arena por año a lo largo de la costa. Este movimiento es referido como el transporte litoral de sedimento o transporte de sedimento paralelo a la costa y, a veces, es interrumpido por construcciones costeras como muelles, rompeolas o escolleras. Estas estructuras bloquean el transporte provocando una acumulación de sedimento corriente arriba de la estructura y erosión corriente abajo. Por lo tanto la presencia de éstas puede causar serias consecuencias de erosión comprometiendo a otras construcciones como caminos, obras de infraestructura, etc. Con el objetivo de anticipar dichos impactos y el de mejorar el diseño de estructuras de protección portuaria es deseable predecir las cantidades de sedimento transportadas en función de las condiciones de ola y corrientes en la zona costera y determinar cómo influye el tamaño del grano de sedimento y la morfología de la playa en el transporte de sedimento (Dragani et al., 1995). Este interrogante condujo a numerosos esfuerzos de investigación tanto en playas naturales como así también en laboratorios.

Para el estudio de playas alejadas de estructuras costeras, y con el objeto de estudiar las variaciones del perfil de playa, a veces es razonable despreciar el transporte de sedimentos paralelo a la costa ya que, en estos casos, el transporte de sedimento perpendicular a la costa es el determinante de la dinámica de las mismas. Dependiendo de las condiciones del oleaje, la pendiente media de la playa, y las características granométricas del sedimento, el transporte de sedimentos perpendicular a la costa puede tener sólo dos sentidos posibles. El transporte desde la línea de costa hacia el mar produce la erosión de playa y la formación de una o varias barras en las distintas posiciones de la línea de rompiente, mientras que el transporte hacia la línea de costa conducen a la acreción y a la formación de la berma. Estos dos tipos de perfiles pueden considerarse como antagónicos y se los denomina perfil barra/berma, invierno/verano o tormenta/normal (Komar, 1998). El perfil de playa, en definitiva, regula la manera en que las olas rompen y disipan su energía. A medida que la altura de la ola crece la playa responde reduciendo su pendiente produciendo una zona de rompiente - donde la energía de la ola se disipa - más ancha. Regulando la pendiente, y formando las barras de rompiente, la playa actúa como un eficaz mecanismo protector de la zona costera resguardándola del intenso embate de las olas. Esta capacidad que tienen las playas naturales de ajustarse hace que se constituyan en la primera y muy eficaz defensa costera.

## OBJETIVO

El objetivo de este Informe Técnico es evaluar y cuantificar la respuesta de perfiles de playa en cuatro zonas particulares de la costa arenosa bonaerense, a saber, I: Partido de la Costa, II: Pinamar-Gesell, III: Mar del Plata y IV: Necochea ante condiciones ambientales energéticas (tormentas). Dichas condiciones corresponden a eventos registrados durante condiciones de tormentas severas en la costa bonaerense (fundamentalmente en Pinamar y en Mar del Plata), parametrizadas sobre la base de datos disponibles en el Servicio de Hidrografía Naval. En la siguiente figura se indican las zonas mencionadas precedentemente.

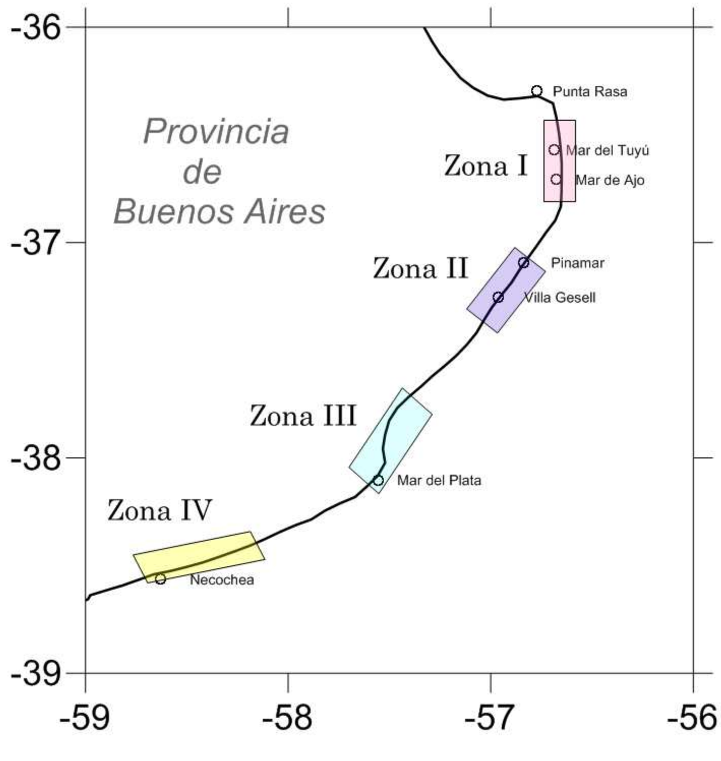



*Figura 2. Zonas de estudio.*

Para concretar dicho objetivo se implementó el modelo S-BEACH (Storm-induced BEAch CHange). Éste es un modelo numérico bidimensional que predice los cambios en el perfil de playa producidos por la acción de las olas y la variación de los niveles del mar. En cada uno de los sitios mencionados se realizó una simulación numérica de tres días de duración, correspondiente a una tormenta típica en la región, con valores de altura de olas y de onda de tormenta altos, relativos a los valores medios correspondientes para cada uno.

## DATOS UTILIZADOS

### Olas

La obtención de los parámetros costeros en Pinamar (Speroni et al., 1999) está basado en el protocolo del *Littoral Environmental Observations (LEO)* del *Coastal Engineering Research Center, U. S. Army, Corps of Engineers, USA* (Schneider, 1981). La altura de la ola en la rompiente se obtuvo promediando la estimación visual de diez alturas consecutivas (Fig. 3). Para estimar el período de la ola en la rompiente se mide el tiempo, en segundos, que tardan once crestas de ola consecutivas en pasar por un punto fijo y arbitrario de la zona de "*surf*". Se deben considerar a todas las olas independientemente de su longitud

de onda. Para la estimación del ángulo de incidencia del frente de ola en la rompiente, el observador dispone de un limbo impreso en el reverso de la planilla del registro. Éste se ubica horizontalmente con la línea de 0º a 180º orientada paralela a la línea de costa. El observador registra el ángulo con el que las olas se aproximan a la costa. Esta dirección es perpendicular a la cresta de la ola. El ángulo utilizado para los cálculos es el que forma la normal al frente con la normal a la línea de costa. Cuando el observador está mirando hacia el mar se asigna, por convención, signo negativo a las direcciones de las olas que provienen del lado derecho y positivo a las direcciones provenientes del sector izquierdo. El tipo de ola se clasifica como tipo "*spilling*" si la cresta se vuelve inestable y rompe cayendo por el frente de la ola y tipo "*plunging*" si la cresta se enrula sobre el frente de la ola y cae en la base produciendo un gran golpe.

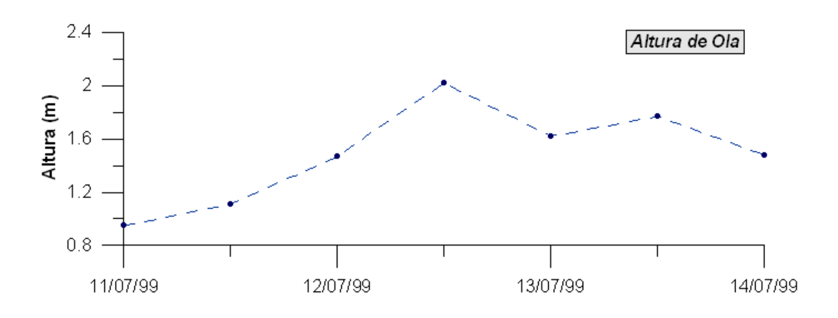



*Figura 3. Alturas de olas en la rompiente (observadas en Pinamar) seleccionadas para las simulaciones.*

**Perfiles de playa**

Se utilizaron perfiles de playa provenientes de tres fuentes diferentes obtenidos en (i) Punta Médanos a principios de la década del '80, en el marco del proyecto COPUAP (Complejo Portuario de Ultramar en Aguas Profundas), (ii) en diversos puntos comprendidos entre los partidos de Pinamar y Necochea, medidos entre 1994 y 2004 y (iii) relevados entre Punta Rasa y Mar de las Pampas, en el marco del proyecto CONICET PIP 2599, entre octubre del 2009 y la actualidad. En la Fig. 4 se muestran las posiciones geográficas correspondientes a la totalidad de los diversos perfiles recabados.

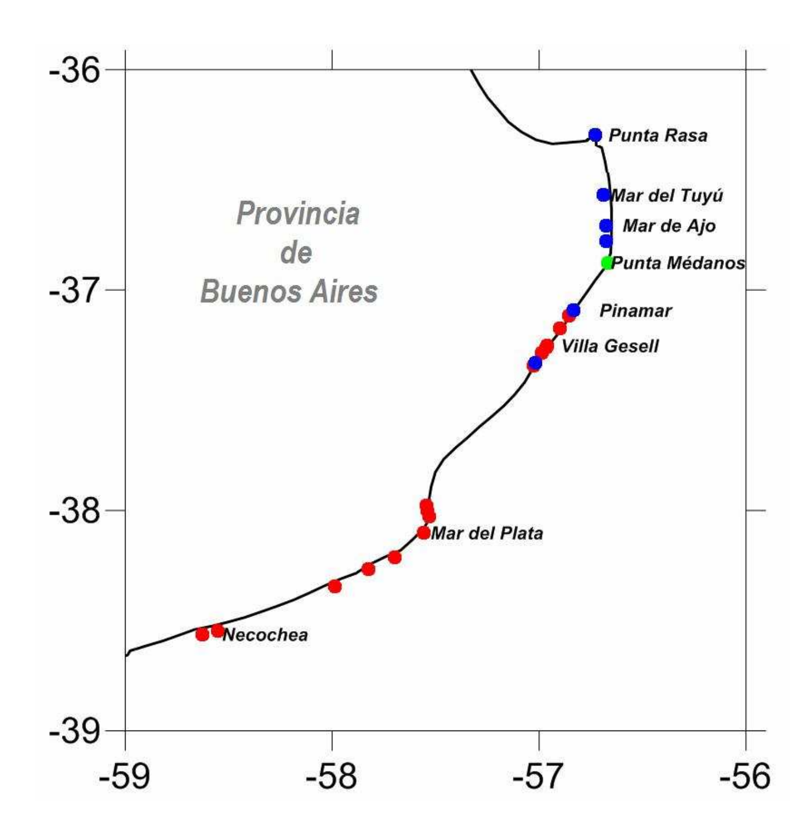



*Figura 4. Sitios en donde los perfiles de playa disponibles fueron relevados.*

En casi todos los sitios donde los perfiles de playa fueron medidos se dispone de relevamientos que comienzan, aproximadamente, en la base del médano costero y que se extienden hasta un poco más de un metro de profundidad, en condiciones de bajamar. Consecuentemente, para completar el perfil de playa subacuático hasta la profundidad de clausura se utilizó una extrapolación teórica basada en la conocida expresión propuesta por Dean (1977):

$$h(x) = A\, x^{2/3}$$

en donde *x* es la coordenada espacial sobre un eje perpendicular a la costa, el parámetro *A* se determinó para cada sitio de interés mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados y *h(x)* es la posición vertical del perfil de playa respecto de un "cero" vinculado a un punto fijo el cual, para los fines prácticos, será reformulado respecto al nivel medio del mar.

En las Figs. 5 a 8 se presentan los cuatro perfiles de playa tal como resultan de los relevamientos de campo en Mar de Ajó (Partido de la Costa), Mar de las Pampas (Villa Gesell), Alfar (General Pueyrredón) y Lobería (Necochea). Los cuales serán posteriormente extendidos hasta la profundidad de clausura para

ser utilizados como condiciones iniciales en las simulaciones realizadas con el S-BEACH.

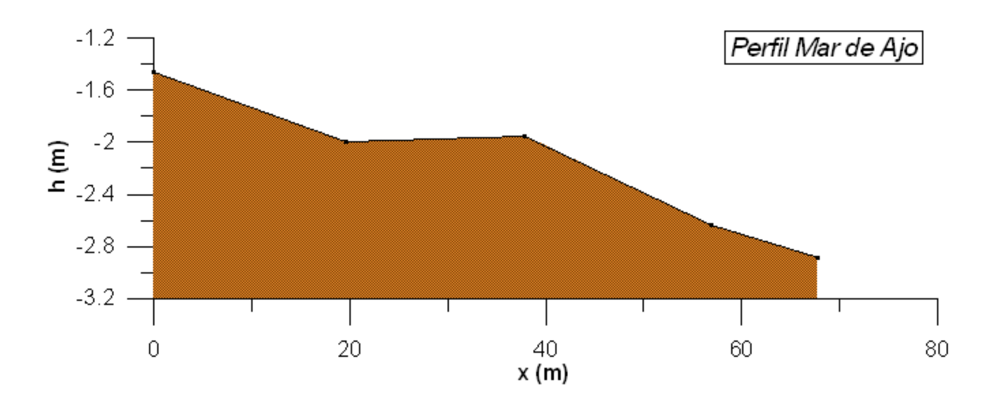



*Figura 5. Perfil de playa relevado en la localidad de Mar de Ajó, Partido de la Costa. Zona I.*

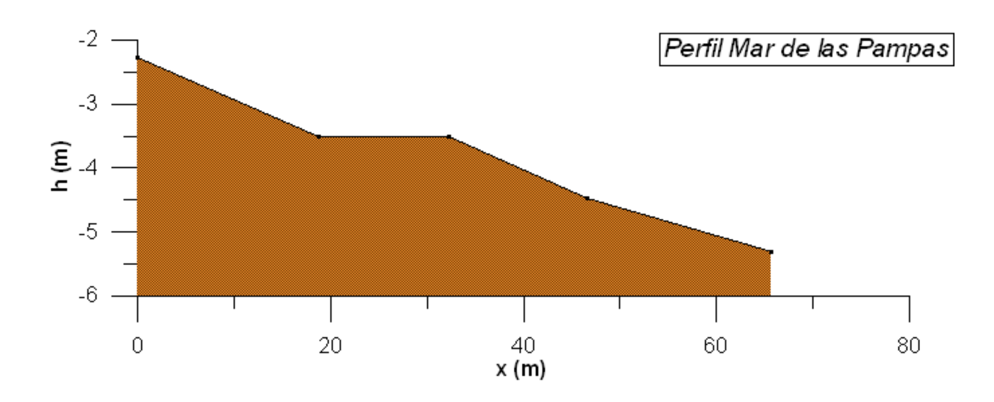



*Figura 6. Perfil de playa relevado en la localidad de Mar de las Pampas, Partido de Villa Gesell. Zona II.*

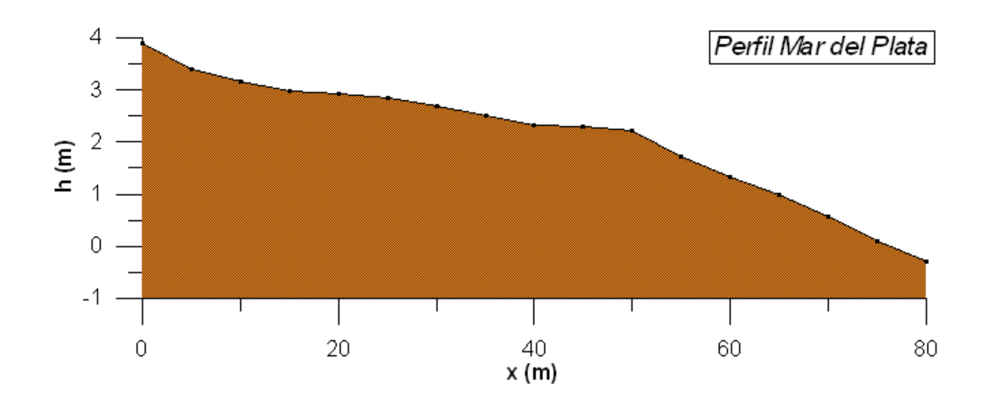



*Figura 7. Perfil de playa relevado en Alfar, Mar del Plata, Partido de General Pueyrredón. Zona III.*

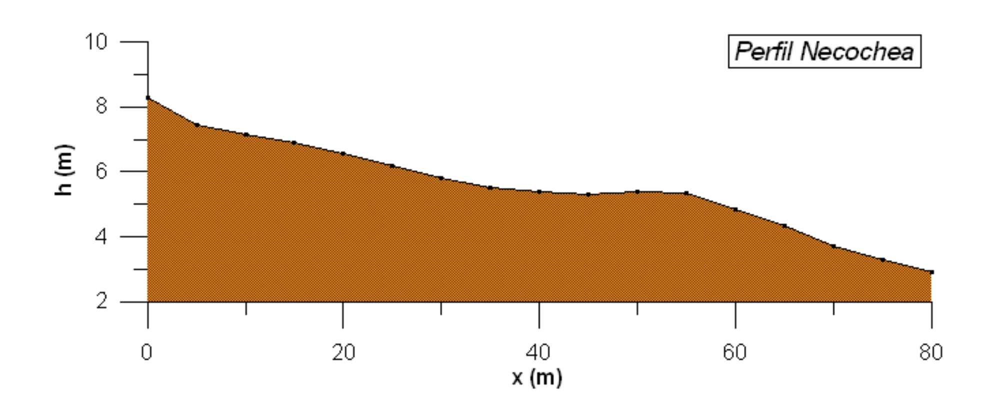



*Figura 8. Perfil de playa relevado en Lobería, Partido de Necochea. Zona IV.*

Los perfiles presentados en las Figs. 5 a 8 fueron relevados mediante nivelación topográfica, con incrementos espaciales variables, con orígenes de coordenada vertical diferente y en situaciones mareológicas distintas. A pesar de ello, en este informe se considera que estos perfiles son representativos de la playa sub-aérea y del comienzo del perfil sub-ácueo en cada una de las zonas analizadas. Utilizando la formulación dada por Dean (1977) los mismos fueron extendidos hasta una profundidad que se puede considerar, a los fines prácticos, como la de clausura. Utilizando criterios oceanográficos y algoritmos simples de interpolación espacial los cuatro perfiles fueron referidos al nivel medio del mar.

**Marea (astronómica)**

El régimen de marea en la zona de estudio es semidiurno con desigualdades diurnas, esto es, dos pleamares y dos bajamares diarias, distintas entre sí. El nivel medio del mar es ligeramente inferior a un metro por encima del plano de reducción (SHN, 2011). Los datos de marea astronómica utilizados en el presente trabajo se generaron a través de una predicción armónica, con intervalo de muestreo de una hora, utilizando constantes armónicas obtenidas mediante el análisis de un registro de niveles de la estación mareográfica ubicada en Mar del Plata. El análisis armónico se realizó mediante la técnica propuesta por Foreman (1977). En la Fig. 9 se presenta la serie de niveles horarios utilizado.

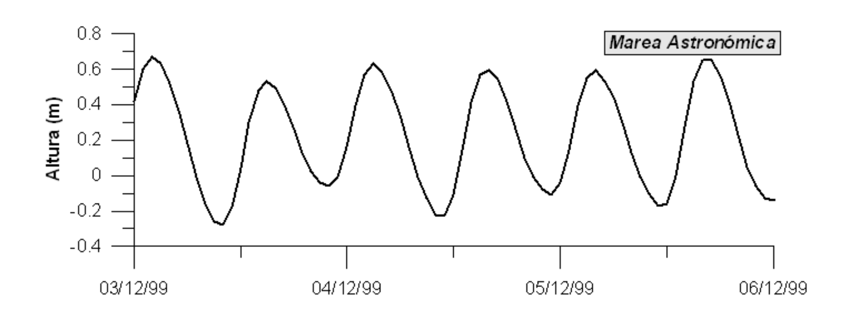



*Figura 9. Marea astronómica, predicha para Mar del Plata, utilizada para las simulaciones.*

## Onda de tormenta

La onda de tormenta es la diferencia (positiva o negativa) entre el nivel observado del mar y la marea astronómica. La causa principal de dicha diferencia se debe a factores atmosféricos, fundamentalmente el viento, por lo cual también es conocida como "marea meteorológica". En este trabajo la onda de tormenta (positiva) utilizada como forzante corresponde a una situación en la cual el nivel del mar observado superó al predicho en un poco más de un metro y medio, siendo esta una situación bastante significativa para la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires. En la Fig. 10 se muestra la onda de tormenta utilizada como forzante del modelo.

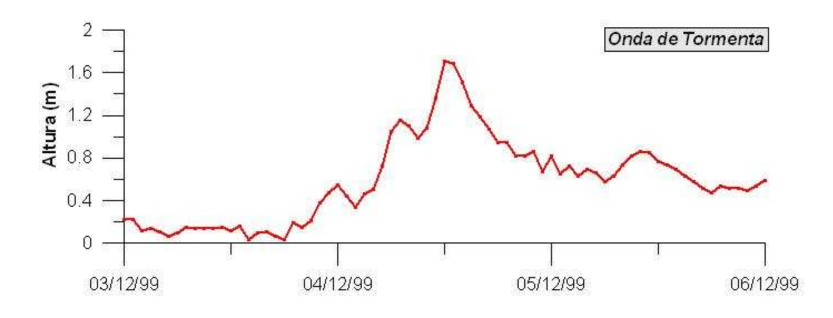



*Figura 10. Onda de tormenta correspondiente a Mar del Plata, utilizada como forzante de los eventos simulados.*

## MODELO SBEACH

El modelo numérico utilizado es el SBEACH es bidimensional y predice los cambios en el perfil de playa producidos por la acción de las olas y las variaciones del nivel del mar. Fue desarrollado conjuntamente por el Coastal Engineering Research Center (CERC), Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) y el Department of Water Resources Engineering (DWRE), Institute of Science and Technology, University of Lund (UL). El modelo tiene la

capacidad de simular la formación y migración de las principales características morfológicas, particularmente las barras y bermas y, además, reproducir la respuesta frente al rellenado de playas (Larson and Kraus, 1989; Larson et al., 1990)

El SBEACH considera solamente el cambio en el perfil de playa producido por el transporte de sedimento perpendicular a la costa. Además, se asume que la rompiente de las olas es la causa principal de los cambios en el perfil de playa y por lo tanto la mayor parte del transporte de sedimento perpendicular a la costa tiene lugar en la zona de "*surf*". Las capacidades principales del modelo son: (a) simular la evolución de un perfil con pendiente arbitraria sujeto a cambios en el nivel del mar y de los parámetros de ola incidente, (b) calcular la configuración de equilibrio del perfil, siempre y cuando todos los parámetros del modelo y los valores introducidos se mantienen constantes, (c) simular la formación y migración de las barras y las bermas, (d) reproducir los cambios en la playa tanto por erosión como por acreción y (e) está verificado para un amplio rango de condiciones reales.

El modelo consta de tres módulos de cómputos que son ejecutados consecutivamente para cada paso temporal en la simulación. Los módulos calculan la distribución de la altura de ola, la tasa de transporte neto de sedimento perpendicular a la costa, y el cambio en el perfil de playa respectivamente. La distribución de la altura de ola se utiliza para calcular la tasa de transporte de la cual se obtiene el cambio en el perfil. Con la nueva configuración bidimensional de playa se repiten los pasos hasta completar la simulación. El procedimiento es llevado a cabo en todos los pasos temporales mediante un esquema de diferencias finitas atrasado en el tiempo. Los intervalos espaciales y temporales utilizados en estas simulaciones son 5 m y 60 minutos respectivamente.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Para cada uno de las cuatro zonas seleccionadas se realizaron simulaciones con SBEACH considerando un mismo forzante oceánico (constituido por olas, marea y onda de tormenta) pero utilizando un perfil de playa con pendientes y granulometría representativo de cada una de las zonas. El objetivo de estas simulaciones es evaluar cuantitativamente la respuesta (volumen de arena erosionado de la playa) ante una misma situación imperante.

A continuación, en las Figs. 11 a 14, se presentan los perfiles iniciales en color azul correspondientes a cada una de las zonas estudiadas, zona I: Mar de Ajó (Partido de la Costa), zona II: Mar de las Pampas (Villa Gesell), zona III: Alfar (General Pueyrredón) y zona IV: Lobería (Necochea), y los finales en anaranjado, resultantes del evento descripto cuya duración fue de 72 horas.

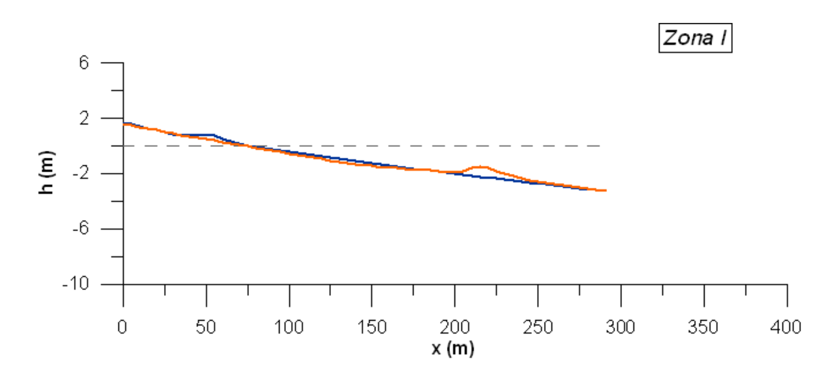



*Figura 11. Perfil inicial (azul) y final (anaranjado) en Zona I, luego de 72 h de simulación con S-BEACH.*

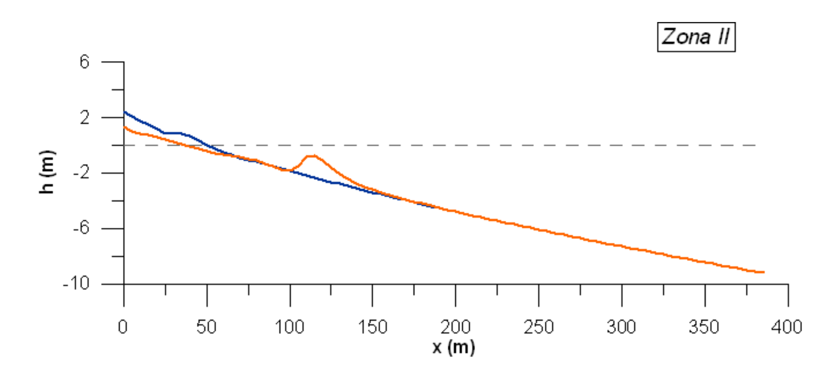



*Figura 12. Perfil inicial (azul) y final (anaranjado) en Zona II, luego de 72 h de simulación con S-BEACH.*

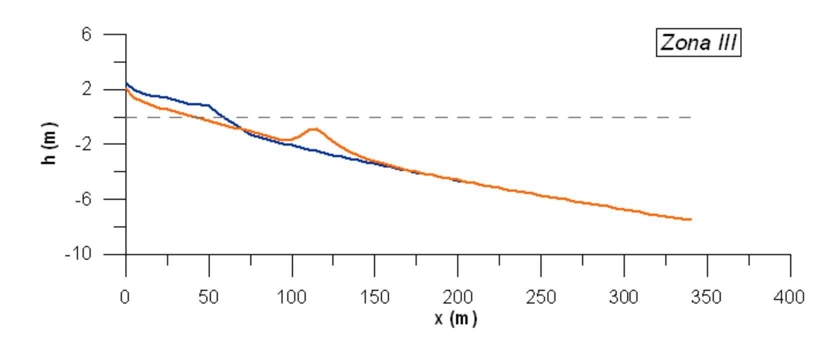



*Figura 13. Perfil inicial (azul) y final (anaranjado) en Zona III, luego de 72 h de simulación con S-BEACH.*

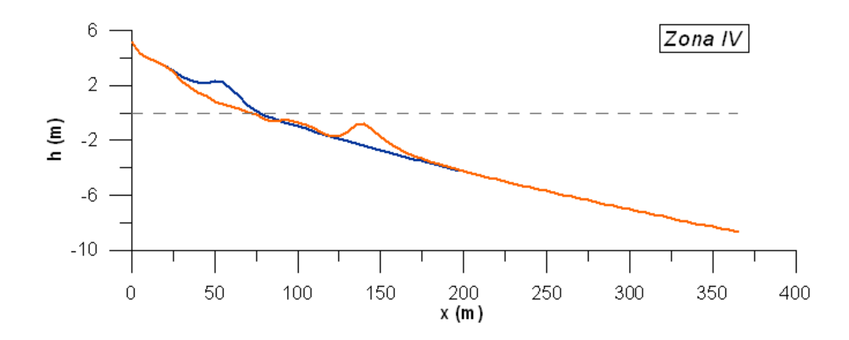



*Figura 14. Perfil inicial (azul) y final (anaranjado) en Zona IV, luego de 72 h de simulación con S-BEACH.*

Del estudio numérico realizado se obtuvo que, luego de la tormenta, la berma desaparece (está completamente erosionada), el perfil de playa desciende (varias decenas de centímetros), retrocede significativamente (algunas decenas de metros) y se origina una barra de arena sub-ácuea en la zona de rompientes. Los volúmenes de arena erosionados por unidad de ancho de playa son 23, 43, 51 y 46 $m^3$/m para las zonas I, II, III y IV, respectivamente. Se infiere, entonces, una tendencia a una mayor movilidad "*off-shore*" del volumen de arena de las zonas ubicadas más al Sur. Vale señalar que la arena erosionada de la playa no se pierde del sistema sino que es reubicada para construir la mencionada barra.

Algunos experimentos numéricos realizados indican que la erosión es fuertemente dependiente de las características del forzante, especialmente de la duración y de los niveles máximos de la onda de tormenta. Se destaca, además, que estos resultados corresponden a playas naturales, no antropogénicamente alteradas, sin construcciones costeras sobre la línea de médanos ni estructuras cercanas como, por ejemplo, espigones o escolleras.

Los resultados aquí obtenidos son de características generales y no deberían ser directamente aplicados en sitios costeros particulares. Ante alguna necesidad puntual, se recomienda la implementación específica del modelo a la situación de interés.

## CONCLUSIONES

Del presente estudio numérico se concluye que, ante un evento severo o tormenta caracterizada por oleaje y onda de tormenta por encima de los

valores medios esperables, se produce una significativa erosión de la playa (normalmente) sub-aérea del orden de 20-50 $m^3/m$. Se observa que la arena es desplazada “*off-shore*” formando una barra sub-ácuea con el material erosionado. En ese sentido no se evidencia pérdida de material. Sin embargo, una condición particular y persistente, que genere una intensa corriente paralela a la costa (“*longshore current*”), podría transportar el material de la barra a lo largo de la costa. Esta situación no esta prevista por el modelo. Cuando el buen tiempo es restablecido, caracterizado por olas del orden de 1 m de altura y períodos del orden 8-12 s, la arena de la barra es trasportada por el movimiento orbital del oleaje hacia la orilla y es reacomodada en la playa seca y en la duna litoral por efecto de viento.

Los resultados tienen una representatividad regional (por zonas) y no pueden ser utilizados para explicar situaciones puntuales, por ejemplo, en playas o balnearios específicos. Para esos casos se recomienda un tratamiento puntual y una implementación particularizada del modelo, con un perfil inicial de detalle y completo, que guarde una muy buena concordancia con la situación de interés. Tampoco estos resultados pueden ser aplicados a sitios con fuerte impacto antropogénico, como ser, playas con construcciones sobre los médanos.

**Referencias**

Dean R., 1977. Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts, Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report Nr. 12. University of Delaware.

Dean, R. and R. Dalrymple, 2002. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press, 475 p.

Dragani, W. C., Caviglia, F. J., Mazio, C. A., Pousa, J. L. y Speroni J. O., 1995. Estudio de corrientes generadas por olas en playas del Partido de la Costa (Pcia. de Bs. As.). S.H.N. Dpto. Oceanografía. Inf. Téc. N° 91/95, 26 p.

Foreman, M. G. G., 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Inst. of Ocean Sci., Patricia Bay, Sidney, B. C., Canada, Pac. Mar. Sci. Rep. 77-10, 97 p.

Komar, P. D., 1998. Beach processes and sedimentation. 2° ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 429 p.

Larson M. y Kraus N. C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Repot 1: Empirical foundation and model development. Tech. Rep. CERC, U.S. Army Engr. Waterways Expt. Station, Coastal Engrg. Res. Center, Vicksburg, M.S, 256 p.

Larson M., Kraus N. C. y Byrnes M.R., 1990. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Repot 2: Numerical formulation and model test. Tech. Rep. CERC, U.S. Army Engr. Waterways Expt. Station, Coastal Engrg. Res. Center, Vicksburg, M.S, 115 p.

Schneider, C., 1981. The littoral environmental observations (LEO). Data collection program. Coastal Engineering Research Center, U. S. Army, Corps of Engineers, CETA81-5, 23 p.

SHN, 2011. Tablas de Marea. Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa.

Speroni, J. O., Dragani, W. C., Mazio, C. A. y Manganiello N. H., 1999. Observaciones costeras en Pinamar, Pcia. de Buenos Aires. Descripción del ambiente litoral. S.H.N., Dpto. Oceanografía, Inf. Téc. Nº 108/99, 15 p.